5Я

УДК 004.021:621.318.3

А.Н. Якимов, В.Я. Гальченко, Д.Л. Остапущенко
ГУ «Луганский государственный медицинский университет»,
г. Луганск, Украина
alex_forever_82@mail.ru

Интеллектуальная система оптимального параметрического синтеза источников магнитных полей с ферромагнитными элементами конструкции

В работе предложена интеллектуальная система оптимального параметрического синтеза источников магнитных полей, содержащих ферромагнитные элементы конструкции как в предположении о постоянстве намагниченности полюсных наконечников, так и для случая учета зависимости намагниченности от напряженности магнитного поля. При проведении синтеза использовался разработанный авторами гибридный алгоритм оптимизации роем частиц с эволюционным формированием состава популяции, позволяющий находить глобальное решение задачи.

При проектировании источников магнитных полей (ИМП) в подавляющем большинстве случаев решается задача анализа распределения магнитного поля, причем заданными являются конструктивные параметры магнитной системы (МС). Однако больший интерес представляет решение задачи проектирования как задачи синтеза, т.е. обратной задачи поиска оптимального размещения в пространстве токозадающих катушек и геометрии МС, обеспечивающих априори заданную конфигурацию магнитного поля в рабочей зоне. Если МС представляется лишь совокупностью катушек, то задача параметрического синтеза обычно сводится к отысканию значений их оптимальных размеров и взаимного расположения, а также величин протекающих в них токов [1]. Задача синтеза значительно усложняется при наличии в конструкции МС ферромагнитных элементов (ФЭ), особенно в случае учета их нелинейных магнитных свойств. При этом анализ поля даже для одного варианта геометрии МС требует существенных затрат машинного времени. Решение же задачи синтеза предполагает многократный анализ различных прототипов конструкции. На данный момент универсального программного обеспечения (ПО), позволяющего решать рассматриваемую задачу оптимального параметрического синтеза ИМП, содержащих ФЭ, насколько известно авторам, не существует.

Целью данной работы является создание интеллектуальной системы (ИС) оптимального параметрического синтеза ИМП с ФЭ, обеспечивающей требуемую топографию поля в рабочем объеме МС.

Задача параметрического синтеза ставится и решается как задача оптимизации некоторой целевой функции, значение которой позволяет оценить степень соответствия полученного распределения поля в объеме априори заданному закону. Разработанная ИС предполагает представление полюсных наконечников МС в виде наборов ферромагнитных полюсных элементов. При этом в качестве варьируемых параметров

используются геометрические размеры катушек, полюсных наконечников, а также габариты самого магнитопровода, которые определяют структуру и геометрию всей МС в целом, и, как следствие, профиль полюсных наконечников электромагнита.

В такой постановке решение задачи синтеза МС предполагает многократное решение задачи анализа, а эффективность проведения синтеза зависит как от особенностей применяемого алгоритма оптимизации, так и от используемых методов расчета поля. Классические методы оптимизации, традиционно используемые для этих целей, ориентированы на определение локального решения задачи поиска экстремума. Существенно больший интерес представляет поиск глобального решения. Поэтому имеет смысл применение алгоритмов оптимизации, обладающих данными поисковыми свойствами. В качестве такого инструмента использовался разработанный авторами гибридный алгоритм оптимизации роем частиц с эволюционным формированием состава популяции [2], [3], основанный на парадигме роевого интеллекта с использованием эволюционных операторов, заимствованных из генетических алгоритмов. Данный бионический мультиагентный алгоритм обладает высокой скоростью сходимости, не требует вычисления производных оптимизируемой функции, позволяет легко учесть ограничения, накладываемые на пространство поиска, и обеспечивает нахождение глобального оптимума.

В разработанной ИС параметрического синтеза входными параметрами являются: тип МС, количество токозадающих катушек, число полюсных ФЭ, а также ограничения на пределы изменений конструктивных параметров МС, магнитные свойства ферромагнетика. Выходными параметрами служат оптимальные значения геометрических размеров МС и найденные значения конструктивных параметров полюсных элементов.

Расчет магнитного поля в рабочем объеме МС предполагает построение математической модели проектируемой системы. В простейшем случае, когда намагниченность полюсных наконечников можно считать постоянной и не зависящей от напряженности внешнего магнитного поля, что характерно для магнитотвердых материалов, обладающих высоким значением коэрцитивной силы, расчет поля, создаваемого электромагнитом, может проводиться в соответствии с формулой

$$\vec{H}(Q) = \frac{1}{4\pi}\sum_{i=1}^{N}\sigma_i \iint_{S_i} \frac{\vec{r}_{PQ}}{r_{PQ}^3} dS_P , \tag{1}$$

где $\vec{H}(Q)$ – напряженность магнитного поля, создаваемого в точке наблюдения Q; N – количество ферромагнитных полюсных элементов; $\sigma_i = \vec{M} \cdot \vec{n}_i$ – поверхностная плотность магнитных зарядов, размещаемых на i-м полюсном элементе; $\vec{M} = const$ – намагниченность полюсных наконечников; $\vec{n}_i$ – внешняя нормаль к поверхности полюсного элемента S_i; $\vec{r}_{PQ}$ – вектор, проведенный из точки истока P в точку наблюдения Q.

При таких допущениях оптимальный параметрический синтез проводился для случаев, когда в рабочем объеме МС требуется создание высокооднородного магнитного поля, а полюсные наконечники представлялись наборами цилиндрических, конических или призматических полюсных элементов [4-8]. Верификация разработанного ПО для случая двух цилиндрических полюсных элементов осуществлялась путем сравнения полученных при синтезе оптимальных значений их параметров с известными соотношениями для шим Роуза (0,02%). В случае синтеза аксиально-симметричной МС

при использовании цилиндрических полюсных элементов удалось обеспечить однородность поля на уровне 20 – 30 ppm (миллионных долей относительного отклонения). Применение в составе полюсов МС конических полюсных элементов позволило повысить однородность поля до значения 10 – 20 ppm. А при синтезе С-образного электромагнита с призматическими полюсными элементами прямоугольного поперечного сечения однородность магнитного поля составила 50 – 130 ppm. Достигнутые характеристики распределения поля в рабочем объеме МС вполне удовлетворяют требованиям, предъявляемым ко многим техническим устройствам.

Однако такая идеализация магнитных свойств является приемлемой в ограниченном количестве приложений. Поэтому математическая модель должна учитывать зависимость намагниченности ферромагнетика от напряженности магнитного поля. В случае предположения о линейной зависимости намагниченности ферромагнитного материала от напряженности поля, которая имеет место для слабых магнитных полей, определение распределения поверхностной плотности магнитных зарядов σ на ФЭ МС возможно с применением аппарата граничных интегральных уравнений (ГИУ) [9]. При этом для аксиально-симметричных МС предполагается, что поверхность, ограничивающая объем, занимаемый ферромагнетиком, разбивается на кольцевые элементы в предположении кусочно-постоянного распределения поверхностной плотности магнитных зарядов на них, а анализ топографии магнитного поля МС удобно проводить в цилиндрической системе координат. В этом случае распределение поверхностной плотности магнитных зарядов описывается интегральным уравнением Фредгольма II рода

$$\sigma(Q) = \lambda \int_l \mathrm{K}(Q,P)\sigma(P)\,dl_P + 2\lambda \vec{n}_Q \vec{H}_0(Q), \tag{2}$$

где $\lambda = \frac{\mu-1}{\mu+1} = \frac{\chi}{2+\chi}$, $\mathrm{K}(Q,P)$ – ядро интегрального уравнения; μ, χ – магнитная проницаемость и магнитная восприимчивость ферромагнитного материала; l – кривая, задающая контур аксиально-симметричной МС; $\vec{H}_0(Q)$ – напряженность внешнего поля, создаваемая токозадающими катушками. После нахождения распределения поверхностной плотности магнитных зарядов σ, поле в рабочем объеме МС может быть рассчитано по формуле

$$\vec{H}(Q) = \frac{1}{4\pi} \iint_S \frac{\sigma(P)\vec{r}_{PQ}}{r_{PQ}^3} dS_P + \vec{H}_0(Q). \tag{3}$$

Решение интегрального уравнения (2) с учетом введенных допущений сводится к решению соответствующей системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) большого порядка, в котором число неизвестных достигает десятков тысяч и для решения которой применялся метод GMRES с проецированием на подпространства Крылова. Значительного сокращения времени, затрачиваемого на расчет коэффициентов СЛАУ, удалось достичь путем учета трансляционной симметрии для кольцевых элементов разбиения, что кроме выигрыша во времени счета позволяет также экономить используемую при проведении вычислений оперативную память компьютера. Разработанное на базе ГИУ и гибридного алгоритма оптимизации ПО успешно использовалось для синтеза аксиально-симметричной МС с цилиндрическими полюсными элементами, предназначенной для генерации высокооднородного магнитного поля [9]. При найденных значениях оптимальных параметров полюсных элементов

однородность магнитного поля, которую удалось достичь в рабочем объеме, составляет около 80 – 90 ppm. Проверка корректности расчета поля при этом проводилась для случая бесконечной пластины, намагничиваемой однородным магнитным полем, для которой известна аналитическая зависимость между напряженностью внешнего поля и величиной поля внутри нее. Погрешность расчета в этом случае не превышала 0,5%.

И, наконец, учет нелинейной зависимости между намагниченностью ферромагнитных элементов конструкции и напряженностью магнитного поля, что характерно для большинства технических приложений и, особенно, для случаев высокой напряженности полей, можно выполнить с использованием пространственного интегрального уравнения [10]

$$\vec{H}(Q)+\vec{M}(Q)=\frac{1}{4\pi}rot_Q\iiint\limits_V\vec{M}(P)\times grad_P\frac{1}{r_{PQ}}\,dV_P+\vec{H}_0(Q), \qquad (4)$$

решаемого совместно с уравнением $\vec{M}=\chi(H)\vec{H}$, описывающим нелинейную зависимость между величиной намагниченности и напряженностью магнитного поля. В случае, когда МС обладает аксиальной симметрией, объем полюсных наконечников и магнитопровода V удобно разбивать на кольцевые элементы и, в предположении постоянства намагниченности в пределах каждого элемента разбиения, решение уравнения (4) сводить к решению системы нелинейных уравнений большого порядка. Верификация разработанного модуля расчета поля в этом случае проводилась также для случая бесконечной пластины, которая моделировалась тонким диском, и для шара, находящихся в однородном магнитном поле. Погрешность расчета в первом случае составляла 0,2%, а во втором – 1,3%. Созданная ИС применялась для проектирования коэрцитиметра с частично замкнутой МС [10-12]. В этих работах для описания геометрии МС использовалась технология On/Off, для ускорения процесса синтеза учитывалась трансляционная симметрия элементов разбиения, а решение нелинейной системы уравнений большого порядка проводилось с помощью метода Ньютона-GMRES. Разработанный в [10] коэрцитиметр позволяет при найденных значениях конструктивных параметров генерировать магнитное поле с однородностью на уровне 0,3%. Приведенные примеры свидетельствуют о высокой эффективности разработанной ИС. Следует заметить, что созданное ПО позволяет получать не только поля с высокой степенью однородности, но и поля, имеющие более сложную пространственную конфигурацию, например, $\mathrm{grad}\,H_z=const$ [12].

Выводы

Разработанный программный комплекс позволяет проводить оптимальный синтез источников поля с ферромагнитными элементами для различных случаев зависимости намагниченности ферромагнетика от напряженности поля и обеспечить требуемую конфигурацию магнитного поля в рабочем объеме проектируемых электротехнических устройств.

Литература

1. Воробьев М.А. Интеллектуальная система компьютерного проектирования соленоидальных многосекционных источников магнитных полей с заданным распределением поля в объеме пространства / М.А. Воробьев // Искусственный интеллект. – 2004. – № 1. – С. 144-151. – Режим доступа к статье: http://www.iai.dn.ua/public/JournalAI_2004_1/Razdel2/01_Vorob%27ev.pdf

2. Гальченко В.Я. Поиск глобального оптимума функций с использованием гибрида мультиагентной роевой оптимизации с эволюционным формированием состава популяции / В.Я. Гальченко, А.Н. Якимов, Д.Л. Остапущенко // Информационные технологии. – 2010. – № 10. – С. 9-16.
3. Гальченко В.Я. Использование эволюционного метода роевого интеллекта для задач принятия решений / В.Я. Гальченко, А.Н. Якимов // Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы. ИИ-2010 : тезисы докл. междунар. науч.-техн. конф., 20-24 сент. 2010 г. – Крым, 2010. – С. 43-47.
4. Гальченко В.Я. Параметрический синтез формы аксиально-симметричных полюсов электромагнита для создания однородного магнитного поля / В.Я. Гальченко, А.Н. Якимов, Д.Л. Остапущенко // Електротехніка і електромеханіка. – Харьков. – 2010. – № 2. – С. 33-36. – Режим доступа к статье: http://www.nbuv.gov.ua/portal/natural/eie/2010_2/10.pdf
5. Гальченко В.Я. Оптимальный синтез высокооднородного магнитного поля в рабочем объеме электромагнита / В.Я. Гальченко, А.Н. Якимов, Д.Л. Остапущенко // Моделювання та інформаційні технології. збірн. наук. праць. міжнар. наук. конф. SIMULATION-2010, 12-14 травня 2010 р. – Київ, 2010. – том 3. – С. 324-330.
6. Гальченко В.Я. Оптимальное конструирование электромагнитов с коническими полюсами для генерации высокооднородного магнитного поля / В.Я. Гальченко, А.Н. Якимов // Электронное моделирование. – 2010. – т. 32. – №6. – С. 85-96. – Режим доступа к статье: http://www.nbuv.gov.ua/portal/natural/em/2010_6/gur-6-10/Galchenko.pdf.
7. Гальченко В.Я. Оптимальное проектирование намагничивающих систем с высокооднородными магнитными полями в дефектоскопическом неразрушающем контроле / В.Я. Гальченко, А.Н. Якимов, Д.Л. Остапущенко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2010. – № 12. – С. 100-109. – Режим доступа к статье: http://www.nbuv.gov.ua/portal/natural/vcpi/etpt/2010_12/art_15.pdf
8. Гальченко В.Я. Оптимальный синтез источников магнитного поля для намагничивающих устройств неразрушающего контроля / В.Я. Гальченко, А.Н. Якимов // Приладобудування 2010: стан і перспективи: збірник тез. допов. міжнар. наук. конф. 27-28 квітня 2010 р. – Київ, 2010. – С. 230-231.
9. Гальченко В.Я. Использование метода граничных интегральных уравнений в оптимальном 3-D проектировании осесимметричных электромагнитов с выбором формы полюсных наконечников / В.Я. Гальченко, А.Н. Якимов, Д.Л. Остапущенко // Електротехніка і електромеханіка. – Харьков. – № 6. – 2010. – С. 20-24. – Режим доступа к статье: http://www.nbuv.gov.ua/portal/natural/eie/2010_6/06.pdf
10. Гальченко В.Я. Решение обратной задачи создания однородного магнитного поля в коэрцитиметрах с частично замкнутой магнитной системой / В.Я. Гальченко, А.Н. Якимов, Д.Л. Остапущенко // Дефектоскопия. – 2011. – № 5. – С. 3-18.
11. Якимов А.Н. Оптимальное проектирование коэрцитиметров с частично замкнутой магнитной системой / А.Н. Якимов, Д.Л. Остапущенко // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке : тезисы докл. междунар. молод. форум, 18-20 апр. 2011 г. – Харьков, 2011. – том 9. – С. 611-612.
12. Гальченко В.Я. Автоматизированное проектирование коэрцитиметров, основанных на пондеромоторном способе исследования магнитных свойств вещества / В.Я. Гальченко, А.Н. Якимов, Д.Л. Остапущенко // Приладобудування 2011: стан і перспективи: збірник тез. міжнар. наук. конф., 19-20 квітня 2011 р. допов. – Київ, 2011. – С. 191-192.

Literatura

1. Vorob’ev M.A. Iskusstvennyj intellekt. № 1. 2004. S 144-151. http://www.iai.dn.ua/public/JournalAI_2004_1/Razdel2/01_Vorob%27ev.pdf
2. Gal’chenko Informacionnye tehnologii. № 10. 2010. S 9-16
3. Gal’chenko V.Ja. Iskusstvennyj intellekt. Intellektual'nye sistemy. II-2010 : mezhdunar. nauch.-tehn. konf., 20-24 sent. 2010 g. : tezisy dokl. Krym. 2010. S 43-47
4. Gal’chenko V.Ja. Elektrotehnika i elektromehanika. Har’kov. № 2. 2010. S 33-36 http://www.nbuv.gov.ua/portal/natural/eie/2010_2/10.pdf
5. Gal’chenko V.Ja. Modelyuvannya ta informacijni texnolohiyi. SIMULATION-2010, 12-14 travnya 2010 r.: mizhnar. nauk. konf. : zbirn. nauk. prac’. Kyiv. Tom 3. 2010. S 324-330
6. Gal’chenko V.Ja. Jelektronnoe modelirovanie. K. T 32. №6. 2010. S 85-96. – http://www.nbuv.gov.ua/portal/natural/em/2010_6/gur-6-10/Galchenko.pdf
7. Gal’chenko V.Ja. Visnyk Nacional'noho texnichnoho universytetu XPI. № 12. 2010. S 100-109 – http://www.nbuv.gov.ua/portal/natural/vcpi/etpt/2010_12/art_15.pdf

8. Gal'chenko V.Ja. Pryladobuduvannya 2010: stan i perspektyvy: mizhnar. nauk. konf. , 27-28 kvitnya 2010 r.: zbirnyk tez. dopov. Kyiv. 2010. S 230-231
9. Gal'chenko V.Ja. Elektrotehnika i elektromehanika. Har'kov. № 6. 2010. S 20-24 http://www.nbuv.gov.ua/portal/natural/eie/2010_6/06.pdf
10. Gal'chenko V.Ja. Defektoskopija. № 5. 2011. S 3-18
11. Jakimov A.N. Radiojelektronika i molodezh' v XXI veke : mezhdunar. molod. forum, 18-20 apr. 2011 g.: tezisy dokl. H. Tom 9. 2011. S 611-612
12. Gal'chenko V.Ja. Pryladobuduvannya 2011: stan i perspektyvy: mizhnar. nauk. konf. , 19-20 kvitnya 2011 r.: zbirnyk tez. dopov. Kyiv. 2011. S 191-192

О.М. Якимов, В.Я. Гальченко, Д.Л. Остапущенко

Інтелектуальна система оптимального параметричного синтезу джерел магнітних полів з феромагнітними елементами конструкції

У роботі розглянуто проектування інтелектуальної системи оптимального параметричного синтезу джерел магнітних полів, що вміщують феромагнітні елементи конструкції, у припущенні постійної намагніченості полюсних наконечників, а також для випадку урахування залежності намагніченості від напруженості магнітного поля. При проведенні синтезу використовувався розроблений авторами гібридний алгоритм оптимізації роєм часток з еволюційним формуванням составу популяції, що дозволяє знаходити глобальне рішення задачі.

A.N. Yakimov, V.Ya. Halchenko, D.L. Ostapuschenko

Intelligent System for Optimal-Parametric Synthesis of Magnetic Field Sources With Ferromagnetic Elements of Construction

In the article designing of intelligent system of optimal-paramentic synthesis of magnetic field sources, containing ferromagnetic elements, in assumption of permanent magnetization and for cases accounting of dependence between magnetization and magnetic intensity, have been considered. During synthesis process hybrid algorithm developed by the authors was used. It allowed to find global solution of the problem.

Статья поступила в редакцию 10.06.2011.